

筋骨格ダイナミック・ロボットの高所からの落下と着地制御

新山 龍馬(東京大学) 國吉 康夫(東京大学)

Passive Landing Control of a Bipedal Musculoskeletal Robot

*Ryuma NIIYAMA (The University of Tokyo), Yasuo KUNIYOSHI (The University of Tokyo)

Abstract— The artificial musculoskeletal system proposed here is based on the engineering concept of using biological structures as guidelines for robot architecture. The design principles of the musculoskeletal robot are derived from kinematic and static analysis. Our experimental system is a pneumatically actuated bipedal robot. The results show that we can control direction of fall by choosing an appropriate stiffness of the legs. We found that the musculo-skeletal leg can act as a physical controller during landing. We also demonstrate the physical ability of the robot to land softly from a one meter drop.

Key Words: Musculoskeletal System, Soft Landing, Biomechanics, Pneumatic Artificial Muscle

1. はじめに

脊椎動物は、特有の身体アーキテクチャと巧みな運動制御によって、多様でダイナミックな運動を行う。動物がもつ実世界知能の理解と、より優れたロボットの開発という観点から、その運動能力が注目されている。

これまで、跳躍ロボットに代表されるような、ダイナミックな全身運動を行うロボットが開発されてきた [1]。しかし、その多くは動きの多様性に欠ける省自由度の専用機械であり、多自由度な身体を活かしたダイナミックな全身運動を行うロボットは実現していない。そこで、生物規範の観点から、脊椎動物だけのものであった多自由度な筋骨格アーキテクチャを工学的に実現する、人工筋骨格系ロボット・アーキテクチャを考える。

ダイナミックな全身動作では、中枢神経系ばかりでなく身体そのものも運動制御の一部を担うと考えられる [2] [3]。筆者らは、筋骨格系をもった跳躍ロボットを開発し、高速な運動調節における筋骨格身体への寄与を明らかにしてきた [4]。筋骨格系の工学的な設計論から、ヒトをふくむ動物の身体運動についての知見や、高い運動能力をもったロボットの実現が期待される。

2. 研究目的

本研究では、高所からの落下と着地を取り上げ、筋骨格アーキテクチャを活かした身体特性の設計と着地制御を提案する。筋骨格ロボットによる実験を行い、運動制御の身体的基盤を明らかにすることを目指す。

3. 筋骨格ロボットと高所からの着地

3-1 人工筋骨格系 (Artificial Musculoskeletal System)

人工筋骨格系は、回転関節で接続された直列リンク系と、以下の要素を備えた駆動系で特徴づけられる。

- 張力のみを伝える伝動要素 (腱, ワイヤ, ベルト)
- 回転方向ごとに独立な駆動系による拮抗駆動
- 減速器を用いないダイレクトドライブ
- 並列・大出力の張力アクチュエータ

ワイヤ駆動によって、多関節の干渉駆動、姿勢によって異なるモーメントアームの設計が実現する。駆動系は

座屈に耐える必要がないので軽量化でき、また関節から分離できる。さらに、内部抵抗が少ない並列・大出力アクチュエータを用いたダイレクトドライブ (DD) によって、高速動作と高い back-drivability が得られる。

3-2 筋骨格ロボット

人工筋骨格系ロボットの外観と矢状面の筋配置を Fig. 1 に示す。ロボットは 5 自由度 × 2 脚、質量は 10 [kg]、全高は 1.2 [m] である。発達した抗重力筋や 2 関節筋を備え、アクチュエータには高い出力/重量比と瞬発力をもつ空気圧人工筋を用いている。電空制御システムを搭載し、関節角や人工筋内圧が計測できる。

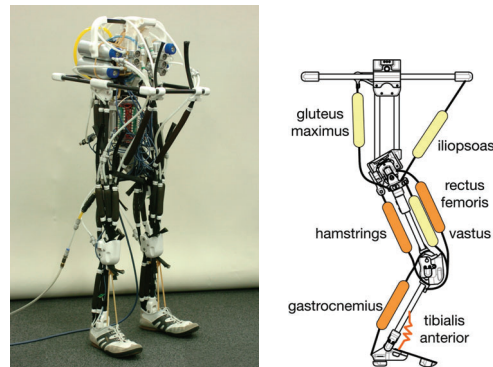


Fig.1 Musculoskeletal robot.

3-3 高所からの着地

高所からの落下と着地というタスクでは、地面の物理的性質および着地の時刻に関する情報が不完全である。また、様々なダイナミック全身運動と共通で、大きな衝撃をとめない、高速な運動制御の必要な動作である。

4. 運動器モデルと出力・剛性の設計

筋骨格系の特性解析と設計のため、関節駆動系をふくむアクチュエータ-リンク系の運動学・静力学的関係を記述する [5]。関節角速度 $\dot{\theta}$ とリンクエンド速度のヤコビ行列を $J(\theta)$ 、関節角速度 $\dot{\theta}$ とアクチュエータ速度・角速度のヤコビ行列を $G(\theta)$ する。この時、微分運動学と静力学の双対性より、関節トルク τ と、リンクエンドに

働く力・モーメント Q およびアクチュエータの並進力・トルク F の平衡は eq.(1) で表せる。

$$\tau = J^T Q, \quad \tau = G^T F \quad (1)$$

さらに，リンクエンド・関節・アクチュエータのステイフネス行列を K_e, K_j, K_a とすると，それらの関係は eq.(2) で表せる。

$$K_j = J^T K_e J, \quad K_a = G^T K_a G \quad (2)$$

以上より，筋骨格系の設計は望みのリンクエンドの出力 Q および剛性 K_e から，アクチュエータ出力 F および剛性 K_a を求める逆問題となる．拮抗駆動や多関節筋を実現できない多関節ロボットでは，出力および剛性の設計自由度が大きく制限される [6] [7] ．

二関節筋をふくむ 10 筋を備えた 3 関節脚の解析例を Fig. 2 に示す．脚特性は，合力ベクトルの凸包と，剛性楕円体で表示されている．筋骨格の設計と制御によって，凸包の形状や広さ，剛性楕円体の軸方向を決定できる．

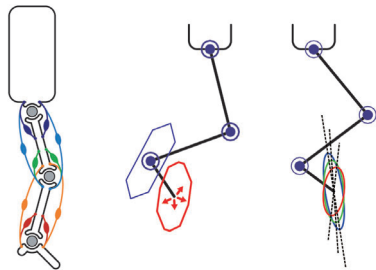


Fig.2 Properties of the musculoskeletal leg.

5. 筋骨格ロボットによる着地実験

5.1 高所からの落下と着地

跳躍ともなう着地や，移動での飛び降りを実験して，高所からの落下と着地の実験を行った (Fig. 3) ．

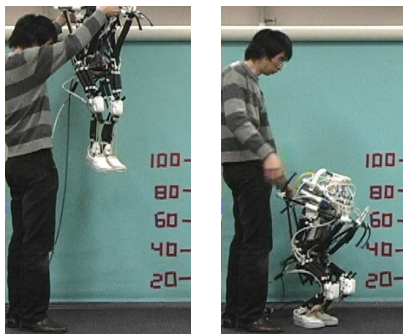
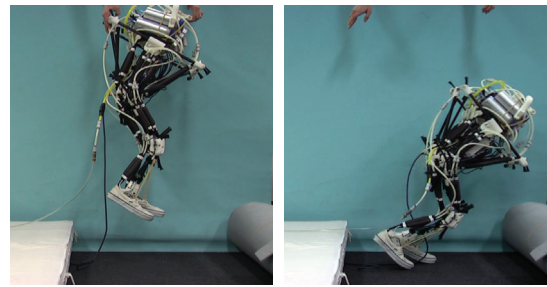


Fig.3 Soft landing from 1.0[m] high.

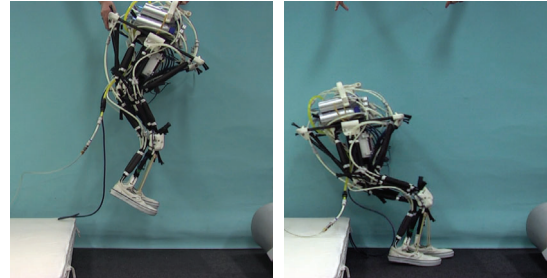
各筋の内圧を一定に制御した状態でロボットの足裏から地面までの距離が約 1.0 [m] の高所から自然落下させた．直立静止するフィードバック制御をもたないため，着地動作後に実験者が補助している．筋骨格系のバックドライバビリティとコンプライアンスを活かして非常に高い位置からの落下と着地を実現した．

5.2 剛性の調節による受動的な着地制御

着地後の姿勢が前傾および後傾になるように，剛性楕円体の長軸の傾きが異なる 2 種類の剛性を設定し，同じ高さ・姿勢から落下させた時の挙動を Fig. 4 に示す．



(b) initial condition and fall forward



(a) initial condition and fall backward

Fig.4 Passive control of landing and direction of fall.

モデル化が困難な衝突・撃力を伴う高所からの着地において，落下の高さや時間を与えずに，受動的な剛性の設定のみで高速な姿勢制御が実現できた．

6. 結論

本研究では，筋骨格アーキテクチャの理解と工学的実現を目指し，高所からの落下と着地を取り上げて人工筋骨格系ロボットによる実験を行った．筋骨格系を活かした脚特性の設計によって受動的な着地制御を実現した．

人工筋骨格系の受動的な特性を活かした着地制御について論じたが，筋・腱の特性とその役割や，感覚フィードバック制御との組合せが課題である．本研究で提案した身体を受動的な特性の設計に，中枢神経系が担っているフィードバック制御を加えることで，動物のようなダイナミックな全身運動の実現が期待される．

参考文献

- [1] 中野栄二, 大久保宏樹. 跳躍ロボット全般について. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 40–45, 1993.
- [2] Rolf Pfeifer, Fumiya Iida, and Gabriel Gómez. Morphological computation for adaptive behavior and cognition. In *International Congress Series*, Vol. 1291, pp. 22–29, 2006.
- [3] Arthur J. van Soest and Maarten F. Bobbert. The contribution of muscle properties in the control of explosive movements. *Biological Cybernetics*, Vol. 69, No. 3, pp. 195–204, 1993.
- [4] Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, and Yasuo Kuniyoshi. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. In *Proc. of the 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pp. 2546–2551(ThC5.2), 2007.
- [5] Koji Ito, Toshio Tsuji, and Mitsuo Nagamachi. Motor impedance and inverse kinematics in musculoskeletal systems. In *IEEE Engineering in Medicine & Biology Society 10th Annual Int. Conf.*, pp. 635–636, 1988.
- [6] Neville Hogan. The mechanics of multi-joint posture and movement control. *Biological Cybernetics*, Vol. 52, No. 5, pp. 315–331, 1985.
- [7] Minayori Kumamoto, Toru Oshima, and Tomohisa Yamamoto. Control properties induce by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles *Human Movement Science*, Vol. 13, pp. 611–634, 1994.